xvieriac
Puerto Iguazú, Argentina

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ
17 al 21 de mayo de 2015

cigré
C1-07

Comité de Estudio C1 - Desarrollo de Sistemas y Economía

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARAGUAYO CON LA OPERACIÓN INTERCONECTADA DE ITAIPU Y YACYRETA

M. A. CÁCERES*
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Asunción
Universidad del Cono Sur de las Américas
Paraguay

S. C. ARRÚA
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Asunción
Paraguay

U.F. KREKELER
Administración Nacional de Electricidad - ANDE
Paraguay

E.R. CHAPARRO
Itaipú Binacional
Facultad Politécnica
Universidad Nacional del Este
Paraguay

Resumen *– El Sistema Eléctrico Paraguayo (SEP), administrando y operado por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), cuenta con dos grandes centrales hidroeléctricas, que operan actualmente de forma separada, alimentando radialmente dos sub-sistemas: el Sub-Sistema 1 (SS1), cuya fuente principal de alimentación es Itaipú, y el Sub-Sistema 2 (SS2), siendo abastecido por Yacyretá. Esta configuración operativa es adoptada como consecuencia de la debilidad del sistema eléctrico, ya que una posible interconexión de las referidas centrales hidroeléctricas en el nivel de tensión de 220kV provocará inestabilidad transitoria; y, además, esta topología resulta en un sistema eléctrico de baja confiabilidad, y restringe la capacidad de transmisión durante contingencias y/o en condiciones de operación de plena carga. En el 2013 fue puesta en operación la línea de transmisión en 500kV, conectando la Subestación de Margen Derecha (SE-MD), de Itaipú, con la Subestación de Villa Hayes (ES-VHA), de la ANDE, denominada LT 500kV MD-VHA. También, en el año 2016, la ANDE prevé la construcción y puesta en servicio de la segunda línea de transmisión, en 500kV, que conectara la Subestación de Ayolas (ES-AYO), con la ES-VHA, denominada LT 500kV AYO-VHA. Estas dos obras representan un importante incremento en la capacidad de transmisión del SEP. El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar, en régimen permanente y dinámico, la estabilidad y confiabilidad de la operación interconectada del SEP, a nivel de 500kV entre Itaipú y Yacyretá, considerando la primera y la segunda línea de transmisión en 500kV. En el estudio se considera la configuración normal de operación de los generadores del sector de 50Hz de Itaipú, con sus estabilizadores de potencia desactivados. También se analiza la ventaja que implica la activación y ajuste local de dichos estabilizadores.*

Palabras clave: Estabilidad de Régimen Permanente y Transitoria – Operación Interconectada – Central Hidroeléctrica de Itaipú y Yacyreta.

1 INTRODUCCIÓN

El SEP se abastece de energía eléctrica principalmente de las centrales hidroeléctricas de Itaipú y Yacyretá. Cuenta, además, con la central hidroeléctrica de Acaray, que funciona como una central de punta, y algunas pequeñas centrales eléctricas de generación térmica de menor porte.

***** socramc1@gmail.com

Actualmente, el SEP se encuentra operando en dos subsistemas aislados: el SS1, cuya fuente principal de alimentación es Itaipú, y el SS2, siendo abastecido por Yacyretá. Dicha separación se debe a la inestabilidad del sistema eléctrico ante una interconexión de los sistemas eléctricos paraguayo, brasileño y argentino, a través de las centrales de Itaipú y Yacyretá, respectivamente, debido principalmente a las diferencias de estatismos entre el sistema brasileño (mayoritariamente con parque generador hidráulico) y argentino (mayoritariamente con parque generador térmico), y el débil vinculo de interconexión con el que se cuenta (una red de transmisión en 220kV en su mayor parte).

Como parte de los refuerzos requeridos para el sistema de transmisión del SEN, con vista a atender la creciente demanda, se ha puesto en servicio la línea LT 500kV MD-VHA. A su vez, para el año 2016, la ANDE tiene prevista la energización de la segunda línea en 500kV, conectando la ES-AYO con la ES-VHA. Con estas dos obras finalizadas, y operando convenientemente, se tendrá un importante incremento en la capacidad de transmisión del SEP, y un vínculo, en 500kV, entre Itaipú y Yacyretá, pudiendo solucionar los problemas de estabilidad [1].

En el presente trabajo se realiza un análisis en régimen permanente y dinámico del SEP con las centrales de Itaipú y Yacyretá operando de forma interconectada, a fin de verificar la viabilidad y la estabilidad de ésta configuración. Para el estudio se considera la configuración normal del sistema de excitación de los generadores del sector de 50Hz de Itaipú, con sus Estabilizadores de Sistemas de Potencia (ESP) desconectados. También, se presenta un análisis de la ventaja de activación y ajuste local de aquellos estabilizadores.

2 ESTABILIDAD ANGULAR

2.1 Conceptos sobre Estabilidad Angular

Los grandes sistemas eléctricos deben ser capaces de operar de forma adecuada, tanto en presencia de pequeñas variaciones de carga, como ante grandes perturbaciones [2].

Cuando varios generadores operan de forma interconectada, sus respectivos rotores giran en sincronismo, en condiciones normales; y, ante una perturbación, deben ser capaces de alcanzar rápidamente un nuevo estado de equilibrio, para mantener el sincronismo y no afectar la operación normal del sistema. Pequeñas variaciones en la carga, o en la generación, pueden ocasionar inestabilidad, dependiendo de las condiciones iniciales de operación, la robustez del sistema de transmisión y del tipo de control de excitación. En el análisis de la estabilidad de pequeñas perturbaciones, es posible linealizar el sistema de ecuaciones que describen la dinámica de los componentes del sistema eléctrico.

Ante grandes perturbaciones, la respuesta del sistema depende de la relación no lineal potencia – ángulo. Usualmente, la configuración topológica del sistema eléctrico se altera luego de la perturbación, por lo que el punto de operación final estable difiere de la condición estable pre-disturbio.

2.2 Dinámica del rotor y Ecuación de Oscilación

En condiciones normales de operación, el torque mecánico de entrada, en un generador, es igual al torque eléctrico de salida, sin considerar las pérdidas mecánicas. Si hay desbalance entre ambos, el rotor acelera, o desacelera. La ecuación (1) describe el comportamiento dinámico del rotor, y se denomina ecuación de oscilación, es la expresión matemática fundamental que gobierna la dinámica rotacional de la máquina síncrona, en los estudios de estabilidad. La variable de estado corresponde a la posición angular del rotor.

$$\frac{2\mathrm{H}}{\omega s}\frac{d^2\delta}{dt^2}=P_a=P_m-P_e \quad (1)$$

2.3 Modelo de Generadores Síncronos

Los generadores síncronos están representados, básicamente, por la ecuación de aceleración del rotor (Ecuación de oscilación), y las ecuaciones de la dinámica del flujo eléctrico, que describen el comportamiento dinámico de los circuitos ubicados en el rotor y en el estator.

Aplicando la Transformada de Park, al sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, se obtiene un sistema de ecuaciones referenciados a los ejes directo y de cuadratura, obteniéndose un modelo consistente en dos redes independientes, sin influencia del uno sobre el otro, en donde los valores de corriente y voltaje son considerados constantes [3].

En el presente trabajo, se utilizó el paquete de software PSAT (Power System Analysis Toolbox); el cual, constituye una herramienta, elaborada para fines académicos y científicos, completamente desarrollada en MatLab®, de distribución gratuita [4]. El PSAT fue elaborado para análisis de régimen permanente y dinámico de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). En ese contexto, fue utilizado el modelo 5.2 (modelo pre-definido) para representar los generadores de Itaipú y Yacyretá.

2.3.1 Regulador Automático de Tensión (RAT)

El RAT es un dispositivo de control, del sistema de excitación de generadores, que regula el voltaje terminal de la máquina, a través de la comparación periódica del voltaje monitoreado en el estator, con un voltaje de referencia. Cuando existe una diferencia substancial entre dichos valores, se genera automáticamente una alteración proporcional en el valor de la corriente de campo, y se produce la cantidad necesaria de reactivos para mantener el voltaje terminal dentro de valores permitidos [3].

Para el ajuste de tal dispositivo de regulación, se recurrió al procedimiento descripto en [5], en donde se altera súbitamente el valor del voltaje de referencia (variación en escalón), y se monitorea el voltaje terminal. Los parámetros se consideran ajustados cuando el error cuadrático medio, entre el voltaje terminal y el de la referencia, son menores que una tolerancia. Tanto el ESP como el Regulador Automático de Velocidad (RAV) deben estar desactivados.

2.3.2 Regulador Automático de Velocidad (RAV)

El objetivo del RAV es mantener la velocidad angular del rotor próxima a un valor pre-especificado (valor nominal), ya que está asociada a la frecuencia del SEP. En los generadores hidráulicos, el RAV debe actuar sobre los dispositivos que controlan la admisión de agua a la turbina. Básicamente, está compuesto por un sensor que se encarga de detectar los cambios en la velocidad de la máquina, y suministra una señal proporcional al error entre la velocidad medida y la referencia, que determina el porcentaje de cierre, o apertura, del distribuidor que regula el flujo de agua en la turbina. En el caso de sistemas eléctricos interconectados, y multi-máquinas, que atienden de forma conjunta a la demanda de potencia, se requiere de una característica importante de los RAVs, denominado *estatismo*, la cual determina la reducción de velocidad, en estado estable, en función de la demanda. Esto se representa a través de la curva *Carga–Velocidad*. El *estatismo* generalmente tiene un valor de 5% para 10% [3]. El ajuste de sus parámetros sigue los delineamientos descriptos en [3].

2.3.3 Estabilizador de Sistemas de Potencia (ESP)

Los ESPs proveen de una señal complementaria al voltaje de referencia del RAT, en el sistema de excitación, para aumentar el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas, lográndose con esto, una mejora substancial del desempeño dinámico. Usualmente, la señal de entrada del ESP es la velocidad angular del rotor [3]**.** Uno de los métodos utilizados para ajuste de los parámetros del ESP tiene como base el criterio de Nyquist [5]. En el presente trabajo, el ESP fue ajustado siguiendo los delineamientos descriptos en [6].

3 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA INTERCONEXIÓN DEL SIN EN 500 KV

3.1 Configuración del SEP

En el presente trabajo, el sistema de transmisión del SEP, en su totalidad, se representa hasta el nivel de 220kV. Se representan a las centrales de Itaipú y Yacyretá, a las principales subestaciones de 500kV: SE-MD, ES-AYO, y ES-VHA, así como todas las subestaciones de 220 kV que son Acaray (ES-ACY), Limpio (ES-LIM), Coronel Oviedo (ES-COV), Guarambaré (ES-GUA), San Lorenzo (ES-SLO), entre otras.

Se emplean modelos pre-definidos del PSAT para representar a los Compensadores Estáticos de Reactivos (CER), en ES-LIM y ES-SLO, siendo representados estos últimos hasta el nivel de 66kV. La central hidroeléctrica de Acaray se representa como una inyección de potencia constante, y los sistemas eléctricos argentino y brasileño, como una carga modelada como impedancia constante.

El modelo propuesto del SIN, representado en el PSAT, fue validado con los resultados obtenidos del programa de flujo de potencia utilizado en la ANDE [7]. Para ello, se realizaron simulaciones de flujo de potencia, utilizando el *software* PSAT, para tres escenarios de carga: demanda máxima del SIN para el verano 2012 – 2013 (Caso Base), aumento del 5% de la carga del Sistema Metropolitano, disminución del 5% de la carga del Sistema Metropolitano, obteniéndose resultados altamente satisfactorios para considerar validado el modelo [2].

3.2 Modelaje y validación de controladores del Sistema de Excitación

3.2.1 Ajuste del RAT y del ESP

Siguiendo el procedimiento descripto en [5], para el RAT se optó por el modelo Tipo III del PSAT, y se realiza la simulación del incremento en escalón del 10% del voltaje de referencia. El ESP y el RAV, del correspondiente generador, están desactivados durante el procedimiento de ajuste.

A su vez, los ESPs de las centrales hidroeléctricas de Itaipú y Yacyretá fueron ajustados siguiendo los delineamientos del criterio de Nyquist, tal como se describe en [6]. Para el ajuste del ESP, se consideran los parámetros del RAT y del RAV ajustados previamente. Para el caso de Yacyretá, fueron comparados los resultados obtenidos del modelo completo, utilizado por la ANDE, con el modelo pre-definido del PSAT, previamente ajustado, obteniendo resultados altamente satisfactorios [2].

3.2.2 Ajuste del Regulador de Velocidad (RAV)

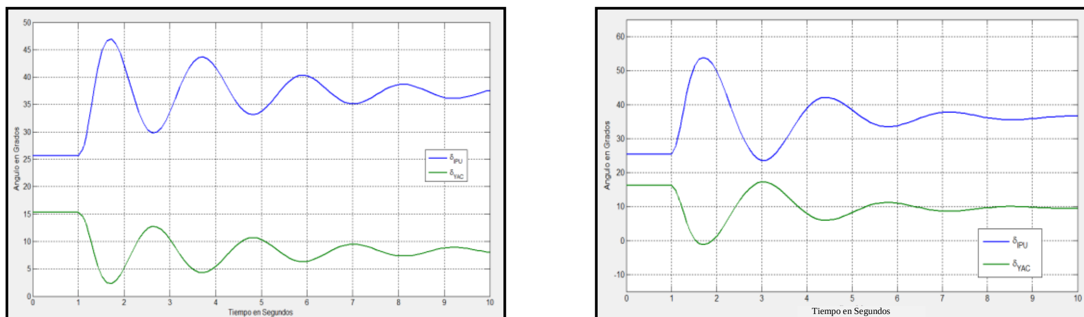
El modelo de RAV utilizado corresponde al modelo Tipo II del PSAT. Los parámetros fueron ajustados considerando el diagrama de Bode de la función de transferencia. Para que el RAV tenga un buen desempeño el margen de ganancia debe ser mayor o igual a 10 dB y el margen de fase debe ser mayor o igual a 50º [8]. Los resultados obtenidos, para representar el RAV, asociado a Itaipú y Yacyretá en el PSAT, fueron satisfactorios, tal como se describe en [2].

3.3 Evaluación del desempeño del SEP interconectado en 500 kV

Fueron consideradas cuatro contingencias: a) Cortocircuito en la SE-MD 500kV y apertura de la LT 500kV MD-VHA, b) Cortocircuito en la ES-AYO 500kV y apertura de la LT 500kV AYO-VHA, c) Cortocircuito en la barra de 500kV de Foz de Iguazú y rechazo de carga del sistema brasileño, y d) Cortocircuito en la ES-AYO 500kV y rechazo de carga del sistema argentino.

3.3.1 Cortocircuito en la SE-MD 500 kV y apertura de la LT 500 kV MD-VHA

Se consideran despachos de Yacyretá al SEP comprendidos entre 500 y 1500 MW. La condición más desfavorable corresponde al despacho de 500 MW. En el mencionado intervalo de despacho de Yacyretá para el SEP, el sistema interconectado permanece estable ante la perturbación simulada. En la **Figura 1** se observa el valor instantáneo del ángulo interno del rotor de Itaipú, δ_{IPU}, y el de Yacyretá, δ_{YAC}, ante la ocurrencia del evento.



(a) δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz sin ESP. (b) δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz con ESP.

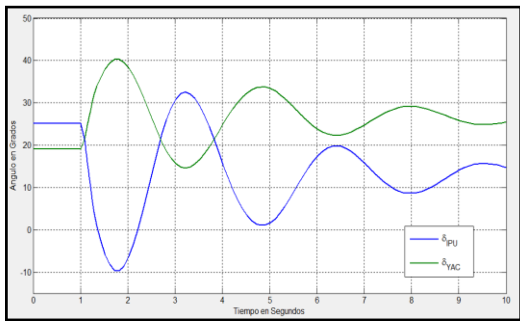
Fig. 1. Ángulo interno de los rotores de los generadores – cortocircuito en SE-MD 500kV.

Se observa un amortiguamiento lento de las referidas variables electromecánicas. Con la implementación de los ESP de Itaipú se logra disminuir la amplitud de las oscilaciones

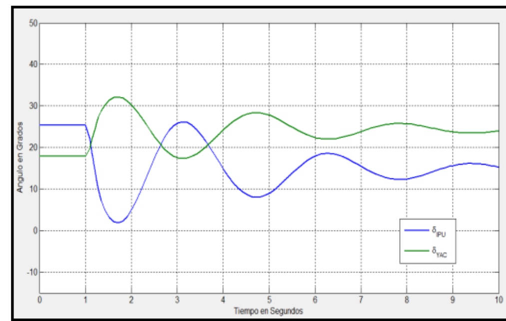
3.3.2 Cortocircuito en la ES-AYO 500 kV y apertura de la LT 500 kV AYO-VHA

Los resultados más relevantes son para los valores de:

- Despacho de Yacyretá al SEP 600 MW: el SEP presenta un comportamiento estable, como se muestra en la **Figura 2**, con los valores instantáneos de los ángulos internos amortiguados. En la misma se ve que δ_{YAC} tiende a acelerar, debido a la falla en la Subestación de Ayolas. Los rotores presentan oscilaciones poco amortiguadas que no se estabilizan luego de transcurridos 4 segundos, el amortiguamiento de las mismas se incrementa con la activación de los ESPs de Itaipú 50Hz.
- Despacho de Yacyretá al SEP 1000 MW: El SEP presenta un comportamiento estable ante la falla simulada, con oscilaciones de amplitud decreciente, conforme se muestra en la **Figura 3**. Son requeridas medidas correctivas de tal forma a no superar las capacidades nominales se las líneas de 220 kV provenientes de Ayolas.



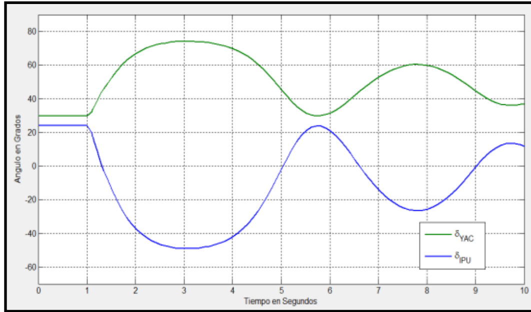
(a) δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz sin ESP.



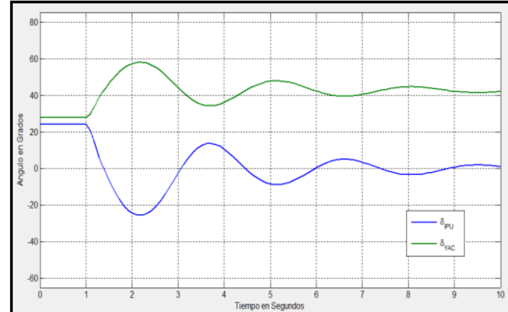
(b) δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz con ESP.

Fig. 2. Respuesta al cortocircuito en ES-AYO 500kV – Despacho de Yacyretá = 600MW.

- Despacho de Yacyretá al SEP 1500 MW: Con un despacho mayor a 1000 MW se pierde el sincronismo entre las máquinas de Itaipú y Yacyretá, como se muestra en la **Figura 4**.



(a) δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz **sin** ESP.



(b) δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz **con** ESP.

Fig. 3. Respuesta al cortocircuito en ES-AYO 500kV – Despacho de Yacyretá = 1000MW.

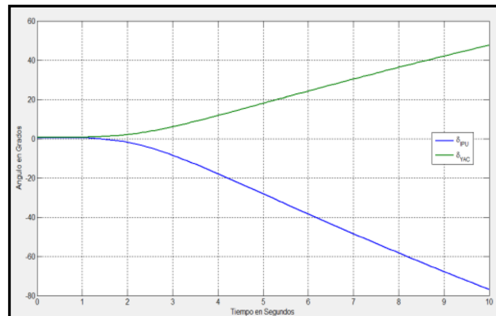


Fig. 4. Respuesta al cortocircuito en ES-AYO 500kV – Despacho de Yacyretá = 1500MW.

Con la disminución del despacho de 1500 MW a 900 MW luego de la perturbación se consigue mantener la estabilidad, aunque se presenta sobrecarga en el sistema de transmisión de 220 kV AYO-SPA. Para evitar esta condición se debe disminuir a 600 MW el valor de despacho de Yacyretá.

3.3.3 Cortocircuito en la barra de 500 kV de Foz y rechazo de carga del Sistema Brasileño

En la condición más desfavorable, cuando Yacyretá despacha al SEP 1500 MW, y desde Itaipú 50Hz, el despacho es de 750 MW, se obtuvieron respuestas estables. En la **Figura 5**, se muestran las curvas de respuesta de los ángulos de los rotores (δ_{IPU} y δ_{YAC}).

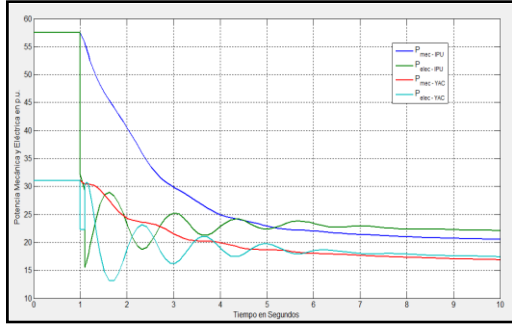


Fig. 5. Respuesta al cortocircuito en Foz 500kV Despacho de Yacyretá = 1500MW.

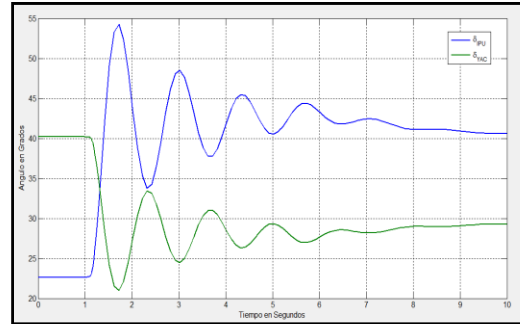


Fig. 6. Respuesta al cortocircuito en Foz 500kV Despacho de Yacyretá = 1500MW.

En la **Figura 6**, se muestra la generación de potencia en Itaipú y Yacyretá, para el mismo evento. Se observa que la generación de ambas disminuye, debido a la pérdida del gran bloque de carga, que representa el Sistema Brasileño.

Se observa, que durante el tiempo de simulación, la potencia mecánica y la eléctrica se mantienen con valores diferentes, lo que indica que el RAV no corrige la frecuencia del sistema eléctrico, tal que permanece fuera de los rangos aceptables, inmediatamente después del disturbio (**Figura 7**). Con la activación y ajuste de los ESPs en Itaipú, se consigue una mejora substancial tanto en el amortiguamiento del sistema como en la regulación de frecuencia (**Figura 8**).

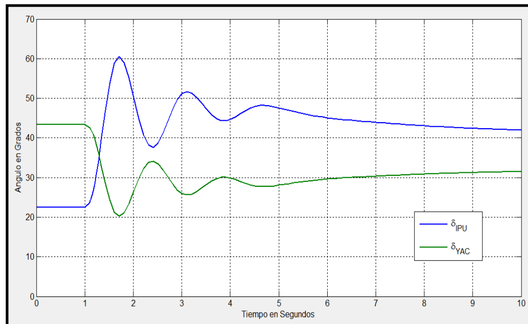


Fig. 7. Respuesta de la frecuencia del SEP luego del cortocircuito en Foz 500 kV.

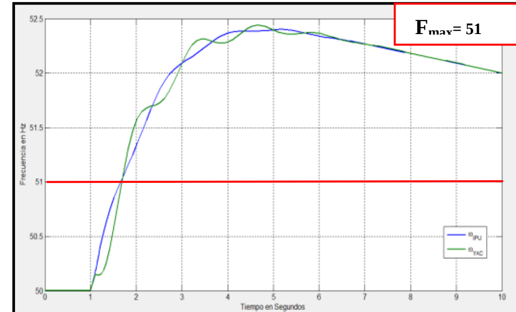
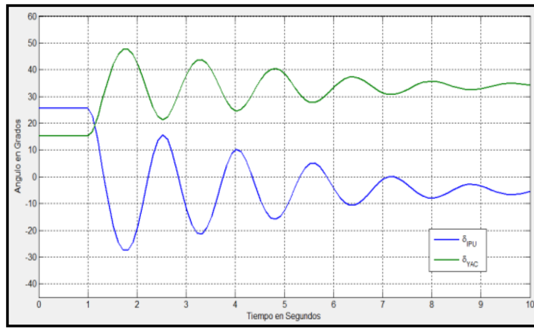


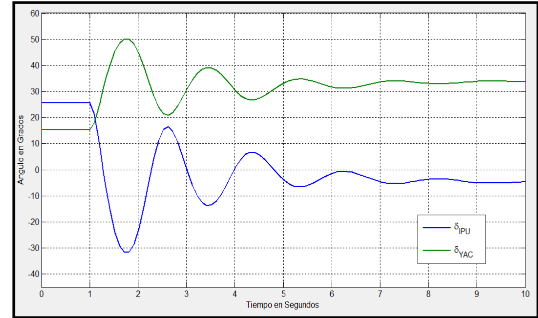
Fig. 8. δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz con ESP – cortocircuito en Foz 500kV.

3.3.4 Cortocircuito en la ES-AYO 500 kV y rechazo de carga del Sistema Argentino

El evento se analizó para valores de despacho de Yacyretá al SEP entre 500 y 1500 MW. La condición de operación inicial crítica corresponde al despacho de 500MW. Las curvas de respuesta de los ángulos δ_{IPU} y δ_{YAC} se muestran en la **Figura 9 (a)**. La respuesta es oscilatoria; sin embargo, con la activación y ajuste de los ESP de Itaipú 50Hz, dichas oscilaciones son amortiguadas, conforme se indica en **Figura 9 (b)**.



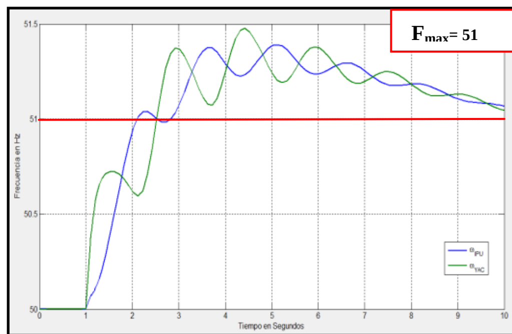
(a) δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz sin ESP.



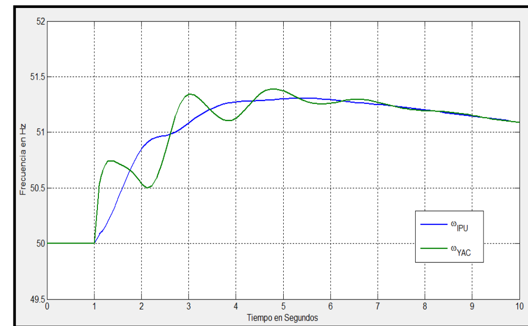
(b) δ_{IPU} y δ_{YAC}, estando Itaipú 50Hz con ESP.

Fig. 9. Respuesta al cortocircuito en ES-AYO 500kV – Rechazo de carga del sistema argentino.

La frecuencia del SEP, luego de ocurrido el cortocircuito, se mantiene fuera de los rangos aceptables, lo que implica emplear medidas correctivas. Con la activación y ajuste del ESP en Itaipú 50Hz se corrige este inconveniente (**Figura 10)**.



(a) Frecuencia del SIP – Itaipú 50Hz sin ESP.



(b) Frecuencia del SIP – Itaipú 50Hz con ESP.

Fig. 10. Respuesta de frecuencia del SIP para el evento simulado.

Como se puede apreciar en la **Figura 10 (b)**, se alcanza un valor máximo de frecuencia igual a 51,4Hz, en régimen transitorio; el cual, se estabiliza en 51Hz en aproximadamente 5 segundos. Sin embargo, aumentando el despacho de Yacyretá al SIN, se consigue obtener una respuesta en el cual la frecuencia del sistema alcanza la frecuencia nominal promedio de 50Hz. Eso ocurre a partir de un valor de despacho de 1000 MW desde Yacyretá.

4 CONCLUSIONES

Ante la posibilidad de una operación interconectada, de los subsistemas SS1 y SS2, teniendo únicamente la línea de 500 kV MD-VHA en servicio, se vio la necesidad de activar y ajustar los ESPs de Itaipú 50Hz, para incrementar el amortiguamiento de las oscilaciones, luego de las grandes perturbaciones consideradas.

Con la segunda LT de 500 kV AYO-VHA, y teniendo los ESPs de Itaipú 50Hz desactivados, se evaluó el posible rango de despacho de Yacyretá al SEP, y se encontró que para valores menores, o iguales a 600 MW, el SEP tiene un comportamiento estable ante la desconexión de LT de 500 kV AYO-VHA, no requiriéndose medidas especiales.

Para valores entre 600 MW y 1000 MW, el comportamiento es estable, pero será necesario medidas correctivas, para evitar sobrecargas en algunas líneas de transmisión. Si el despacho es mayor a 1000 MW se presentarán problemas de estabilidad, requiriéndose medidas correctivas para evitar pérdida de sincronismo. Conforme con los resultados obtenidos, con la activación de los ESPs de Itaipú, mejora el desempeño transitorio del SEP.

Además, se observó la necesidad de implementar un sistema de control automático de generación a fin de controlar, y regular, también, el equilibrio carga-frecuencia del SEP y sus intercambios con los sistemas eléctricos brasileño y argentino. Por lo tanto, la interconexión de las centrales de Itaipú y Yacyretá es viable, teniendo en cuenta las restricciones de despacho de Yacyretá al SEN.

5 CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Plan Maestro de Generación y Transmisión, Periodo 2012 – 2021, ANDE.

[2] Marcos C., Silvia A. *Análisis de estabilidad del Sistema Eléctrico Paraguayo con la operación interconectada de las centrales de Itaipú y Yacyretá*. Trabajo Final de Grado – Facultad de Ingeniería de la UNA, 2012.

[3] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Programa ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos. Manual de Usuário V10.04.05, Rio de Janeiro – Brasil.

[4] Federico M., *User Guide* for PSAT v.1.3.4, 2005. http://faraday1.ucd.ie/psat. http://www.uclm.edu

[5] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.

[6] Martins N., Lima L. T G, "*Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small-Signal Electromechanical Stability Problems*". IEEE Symposium on Application of Eigen analysis and Frequency Domain Method for System Dynamic Performance, 1989.

[7] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Programa ANAREDE – Programa de Análise de Redes. Manual de Usuário V09.07.05, Rio de Janeiro – Brasil.

[8] Ogata K. *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, 2003.